

DOI: 10.11779/CJGE2021S2004

# 考虑渗流影响的软土管幕箱涵开挖面稳定分析

刘奕晖<sup>1, 2</sup>, 黄茂松<sup>\*1, 2</sup>, 王浩然<sup>3</sup>, 张中杰<sup>3</sup>, 潘伟强<sup>4</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 4. 上海隧道工程有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 管幕箱涵工法可以有效减小施工对地面交通的影响, 适用于城市密集空间条件下的地下穿越工程。通过引入开挖面前方水头分布拟合公式, 提出了考虑渗流影响的管幕箱涵开挖面稳定性极限平衡法, 并对该极限平衡法进行了算例和工程实例的有限元模拟验证。极限平衡法计算结果和算例及实际工程案例的有限元模拟结果较为一致, 验证了本文极限平衡法的合理性和有效性。研究发现, 地下水渗流会对管幕作用下的箱涵开挖面稳定产生较大影响, 维持开挖面稳定的极限支护压力远大于无地下水作用的情况, 在实际工程中应考虑地下水渗流的影响。

**关键词:** 管幕箱涵工法; 渗流; 开挖面稳定; 极限平衡法; 有限元

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0015-04

**作者简介:** 刘奕晖(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程稳定性问题研究。E-mail: Yihui\_Liu1002@126.com。

## Stability of excavation face in soft soils by roof-box jacking method considering seepage

LIUYI-hui<sup>1, 2</sup>, HUANG Mao-song<sup>\*1, 2</sup>, WANG Hao-ran<sup>3</sup>, ZHANG Zhong-jie<sup>3</sup>, PAN Wei-qiang<sup>4</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design

& Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China; 4. Shanghai Tunnel Engineering Construction Co., Ltd., Shanghai

200032, China)

**Abstract:** The roof-box jacking method can significantly reduce the impact of construction on ground traffic. It is suitable for underground engineering under the dense urban space. The limit equilibrium method for the stability of excavation face with pipe curtain considering seepage is proposed by introducing the fitting formula for distribution of water head in front of the excavation face. The new method is verified through finite element simulations of examples and an actual project case. The results by the proposed method are in consistent with those by the finite element simulations, which verifies the rationality and effectiveness of the method. The analysis shows that the seepage has a great influence on the stability of the excavation face with pipe curtain, and the limit support pressure to maintain the stability of the excavation face is much greater than that without considering groundwater. The influences of seepage should be considered in practical projects.

**Key words:** roof-box jacking method; seepage; excavation surface stability; limit equilibrium method; finite element method

## 0 引言

管幕箱涵法通过在箱涵顶进位置外围形成封闭性的管幕空间, 而后在管幕的围护下顶进箱涵, 实践证明该工法可有效控制地表沉降和开挖区域周围土层稳定性。管幕箱涵开挖面稳定性研究基于无超前支护的隧道开挖面稳定问题。日本学者村山氏等<sup>[1]</sup>假设滑动面为对数螺旋线, 建立了二维情况的极限支护压力极限平衡法。吕玺琳等<sup>[2]</sup>采用极限平衡法和极限分析法对盾构隧道开挖面稳定性进行分析得到了类似地基承载力的三项系数公式。Lee 等<sup>[3]</sup>研究了地下水渗流对开挖面稳定安全系数的影响, 表明支护压力大部分被用

于平衡渗流力。Xie 等<sup>[4]</sup>基于村山模型, 引入弹性地基梁模拟管幕结构力学作用, 通过数值模拟进行验证, 得到管幕结构对开挖面稳定性的影响机理。谢雄耀等<sup>[5]</sup>开展了管幕作用下矩形开挖面稳定性的重力场非相似模型试验, 系统性研究了管幕作用下开挖面失稳及环境影响机理。目前针对富水软土地区的管幕箱涵开挖面稳定性理论研究较少考虑渗透作用对开挖面稳定性

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(51738010); 国家重点研发计划项目(2016YFC0800200)

**收稿日期:** 2020-08-18

**\*通信作者** (E-mail: mshuang@tongji.edu.cn)

的影响,因此本文基于极限平衡法,引入箱涵开挖面前方水头分布拟合公式,建立了考虑地下水渗流的管幕箱涵开挖面稳定性的理论分析模型,并通过算例和工程实例分析对该方法的适用性和准确性进行验证,分析了地下水渗流对管幕箱涵开挖面稳定性的影响。

## 1 考虑渗流的管幕箱涵开挖面稳定性理论模型

对考虑渗流的问题,使用土条边界的孔压条件并选用饱和重度的分析方法与使用渗透力作为附加力并选用有效重度的分析方法给出的结果一致。本文选用前一种方法,假定渗流是稳态渗流,土体天然重度为 $\gamma$ ,饱和重度为 $\gamma_{\text{sat}}$ ,土体有效黏聚力为 $c'$ ,有效内摩擦角为 $\varphi'$ ,管幕抗弯刚度为 $EI$ ,相邻管幕中心点间距为 $b$ ,地面超载为 $q$ ,箱涵顶面至地面距离为 $C$ ,箱涵高度为 $D$ ,箱涵顶面至地下水位距离为 $H$ ,开挖面孔压 $u=0$ 。假设滑动面形状为对数螺线 $R=R_0 e^{(\theta-\varphi')\tan\varphi'}$ ,式中 $R_0=D/\{\cos(\pi/4-\varphi'/2)\exp[(\pi/4-\varphi'/2)\tan\varphi']-\sin\varphi'\}$ 。图1为考虑地下水渗流条件下的管幕箱涵开挖面稳定极限平衡法计算模型示意图。图中 $l_a=\sin(\pi/4-\varphi'/2)R_0\exp[(\pi/4-\varphi'/2)\tan\varphi']$ , $l_b=R_0\cos\varphi'-l_a$ 。

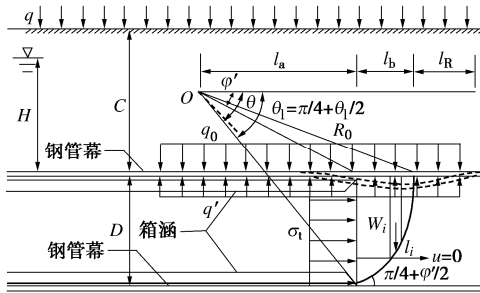


图1 渗流条件下极限平衡法计算示意图

Fig. 1 Diagram of limit equilibrium method under seepage

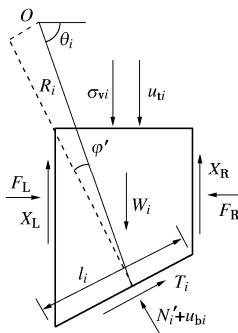


图2 渗流条件下土条受力情况图示

Fig. 2 Forces acting on a typical soil strip under seepage

根据图2的渗流条件下土条的受力平衡图示,可以得到土条的重力对 $O$ 点的力矩 $dM_w$ ,即

$$dM_w = \gamma_{\text{sat}} l_i \cos\alpha (R_i \sin\theta_i - R_0 \sin\varphi') R_i \cos\theta_i, \quad (1)$$

式中, $l_i = R_i \sec\varphi' d\theta$ ,  $\alpha = \pi/2 + \varphi' - \theta_i$ 。

由于管幕作用,开挖面失稳时作用在土条上的上覆土压力为 $\sigma_v = q_0 - q'$ 。 $q_0$ 取 Terzaghi 松动土压力,可分为地下水位以下部分和地下水位以上部分,根据有效应力原理及文献[4, 5]的表达式, $q_0$ 可表示为

$$q_0 = \frac{\gamma l_u - c'}{K_0 \tan\varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{(C-H)K_0 \tan\varphi}{l_u}} \right] e^{-\frac{HK_0 \tan\varphi'}{l_u}} + q' e^{-\left[ \frac{(C-H)K_0 \tan\varphi' + HK_0 \tan\varphi'}{l_u} \right]} + \frac{\gamma' l_u - c'}{K_0 \tan\varphi'} \left[ 1 - e^{-\frac{HK_0 \tan\varphi'}{l_u}} \right]. \quad (2)$$

引入弹性地基梁概念对管幕结构进行受力变形分析求解其所受到的地基反力 $q'$ [4],代入 $q_0$ 和 $q'$ 得到土条上覆土压力产生力矩 $dM_q$ 为

$$dM_q = \sigma_v l_i \cos\alpha R_i \cos\theta_i. \quad (3)$$

本文假设管幕结构不影响渗流场的分布,采取 Perazzelli 等[6]根据数值分析结果拟合出的隧道开挖面前方水头分布来近似考虑管幕箱涵开挖面附近的渗流场,水头分布拟合式如下:

$$h(x, y, z) = h_F + (1 - e^{-b\frac{x}{D}}) \Delta h. \quad (4)$$

式中 $h_F$ 为开挖面中点水头高度; $b$ 是文献[6]通过数值分析拟合的参数; $x$ 为开挖面前方距开挖面距离; $\Delta h$ 为水位线和开挖面中点处水头差值。

根据水头分布拟合式以及土条的受力情况得土条边界受到的孔隙水压力关于 $O$ 点产生力矩大小为

$$dM_u = u_{vi} l_i R_i \sin\varphi' + u_{vi} l_i R_i \cos\theta_i. \quad (5)$$

一个土条产生的抗力矩 $dM_c$ 为

$$dM_c = dM_{ct} - dM_{cn} = c' R_i l_i \cos\varphi'. \quad (6)$$

对整个滑动土体,总支护压力产生阻力矩 $M_1$ 为

$$M_1 = \sigma_t D \left( R_0 \sin\varphi' + \frac{1}{2} D \right). \quad (7)$$

考虑式(2)至式(7),求解滑动土体关于 $O$ 点力矩平衡方程可得总支护压力 $\sigma_t$ 的表达式:

$$\sigma_t = \frac{\int_{\varphi'}^{\theta_i} dM_w + \int_{\varphi'}^{\theta_i} dM_u + \int_{\varphi'}^{\theta_i} dM_q - \int_{\varphi'}^{\theta_i} dM_c}{D(R_0 \sin\varphi' + D/2)}. \quad (8)$$

对于本文的不考虑地下水渗流情况,即开挖面不发生渗透(不排水),开挖面孔压按静水压力分布,所以将式(8)求出的总支护压力减去开挖面中点处的孔压即可得到文献[7]所提到的有效支护压力。

## 2 数值模拟验证与工程实例分析

### 2.1 不考虑地下水作用的开挖面稳定算例验证

由第1节的方法可知当管幕最大变形 $\delta_{\text{max}}=0$ 时,管幕结构对开挖面稳定性无影响,方法可退化为无超前支护隧道开挖面稳定的极限平衡法。由于隧道开挖面稳定性研究相对成熟,因此为验证1.1节方法的适

用性, 令  $\delta_{\max}=0$ , 不考虑地下水的作用, 选用王浩然等<sup>[7]</sup>的算例进行验证, 计算参数与其保持一致。在  $C/D=0.5$ ,  $C/D=1$  和  $C/D=2$  情况下极限平衡法结果和文献<sup>[7]</sup>弹塑性有限元法结果的对比如图 3 所示。

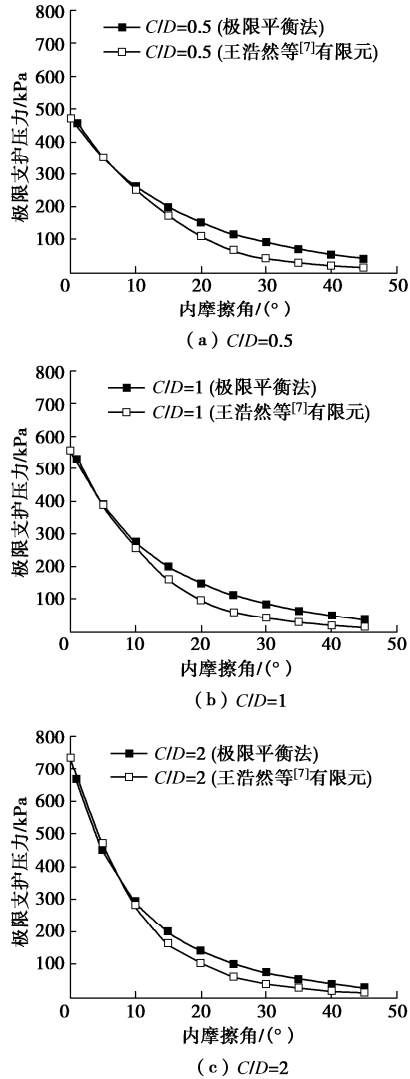


图 3 极限平衡法和弹塑性有限元结果对比

Fig. 3 Comparison between limit equilibrium method and elasto-plastic finite element method

由图 3 可知: 在内摩擦角小于  $10^\circ$  时, 极限平衡法与有限元法结果十分接近; 随着内摩擦角继续增加, 极限平衡法结果逐渐大于有限元法结果, 在内摩擦角为  $25^\circ \sim 30^\circ$  时, 偏差最大; 内摩擦角大于  $30^\circ$  后, 极限平衡法结果与有限元结果偏差逐渐减小。总体上两种方法结果比较接近, 验证了无地下水作用下, 无超前支护隧道开挖面稳定极限平衡法的合理性和适用性。

## 2.2 考虑地下水渗流的开挖面稳定算例验证

本文涉及地下水渗流问题, 因此有必要先验证渗流条件下无超前支护隧道开挖面稳定极限平衡法的合理性和适用性。令管幕结构最大变形  $\delta_{\max}=0$ , 此时渗流条件下的开挖面稳定性分析简图如图 4 所示, 其中  $D$  为箱涵高度、 $C$  为上覆土层厚度,  $H$  为地下水位到

箱涵顶部距离。

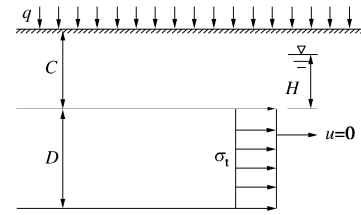


图 4 渗流条件下的开挖面稳定性分析简图

Fig. 4 Diagram of face stability analysis under seepage

选择文献<sup>[7]</sup>中两个算例进行分析: ①  $D=10$  m,  $C=20$  m, 有效黏聚力  $c'=2$  kPa, 有效内摩擦角  $\phi'=30^\circ$ , 饱和重度  $\gamma_{\text{sat}}=19$  kN/m<sup>3</sup>; ②  $D=5$  m,  $C=20$  m, 有效黏聚力  $c'=0$  kPa, 有效内摩擦角  $\phi'=35^\circ$ , 饱和重度  $\gamma_{\text{sat}}=15.2$  kN/m<sup>3</sup>。将极限平衡法结果和该文献的弹塑性有限元结果比较, 绘制两个算例总支护压力与水位线的关系图如图 5 所示。

由图 5 可知, 地下水渗流的存在会大大提高开挖面所需的支护力, 渗流对开挖面稳定性有显著的不利影响。两个算例极限平衡法结果与有限元方法结果接近, 且随着水位线升高, 极限支护压力增加斜率和有限元法基本一致, 这说明了使用该水头分布的假设可以较为准确地考虑渗流的影响。因此, 通过两个算例的验证可以说明考虑渗流影响的无超前支护隧道开挖面稳定性极限平衡法的合理性和适用性。

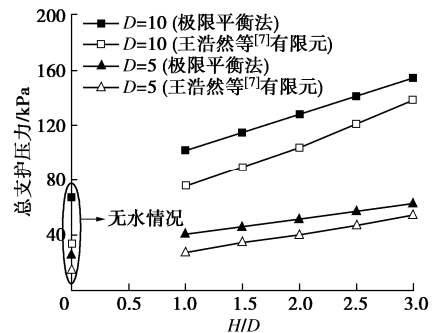


图 5 总支护压力与水位线关系图

Fig. 5 Relationship between total support pressure and underground water level

## 2.3 管幕箱涵开挖面稳定工程实例分析

以上海市田林路下穿中环线工程为例, 应用极限平衡法和有限元方法分别进行计算。有限元法使用 Abaqus 建立二维有限元模型, 土体采用莫尔库仑准则进行描述, 管幕结构按弹性材料进行模拟, 上覆土层厚度  $C=6.5$  m, 箱涵高度  $D=6.5$  m, 管幕结构单根钢管直径  $d=800$  mm, 管幕结构弹性模量  $E_p=2.1 \times 10^5$  MPa, 泊松比  $\mu_p=0.28$ , 分别计算不考虑地下水、不考虑地下水渗流和考虑地下水渗流 3 种情况。3 种情况孔压边界条件分别为无孔压边界条件、模型上表面施加零孔压条件和模型上表面和开挖面施加零孔压条

件。有限元法通过将支护压力分步减小的方法获得开挖面失稳状态。土层计算参数与文献[5]一致,考虑地下水时有效抗剪强度指标参考上海市基坑规范推荐公式 $\varphi' = 0.7(c_{cq} + \varphi_{cq})$ ,由直剪固结快剪指标换算得来。根据有限元结果中的管幕沉降范围和竖向沉降最大值确定理论模型中管幕变形参数 $\lambda$ 和 $\delta_{\max}$ 。理论计算土体重度取结构以上土层按厚度加权平均重度,有效强度参数取值方法和有限元相同,弹性模量 $E_p$ 取值与有限元一致,惯性矩 $I=1.56 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ ,相邻管幕中心点间距 $b=0.9 \text{ m}$ 。图6为支护压力与隧道中心点位移关系图。

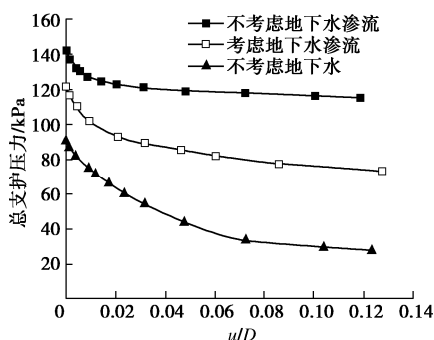


图6 总支护压力与开挖面中点位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between total support pressure and displacement

表1 有限元模拟与极限平衡法计算结果对比

Table 1 Comparison between finite element method and limit equilibrium method

计算方法	总支护压力 $\sigma_t$ /kPa		
	不考虑地下水	不考虑地下水渗流	考虑地下水渗流
有限元法	33.60	115.74	70.65
极限平衡法	40.63	131.86	85.51
偏差率	20.92%	13.93%	21.03%

有限元和极限平衡法结果对比如表1所示,以有限元结果为参考评估极限平衡法结果准确性。计算结果反映出渗流对开挖面极限支护压力有较大影响,考虑地下水渗流时极限支护力大大增加。同时极限平衡法结果偏差率均不超过21%,总体上支护力计算误差在工程允许范围内,极限平衡方法基本满足工程需要,可用于实际工程进行考虑渗流影响下支护力的确定。

### 3 结 论

本文通过引入开挖面前方水头分布拟合式,建立了考虑地下水渗流影响的管幕箱涵开挖面稳定性的极限平衡方法,并对该极限平衡法进行了算例和工程实例的有限元模拟验证。得出以下结论:

(1)建立的考虑渗流影响的管幕箱涵开挖面稳定

极限平衡法与有限元结果较为吻合,该方法适用于软土地区稳态渗流条件下无超前支护的隧道开挖面以及管幕箱涵开挖面极限支护压力计算,对今后的工程实践有一定应用价值。

(2)地下水渗流对开挖面稳定有明显的不利影响,考虑地下水渗流时极限支护压力远远大于不考虑地下水的结果,在使用管幕箱涵工法的实际工程中应考虑地下水渗流的影响。

### 参考文献:

- [1] MURAYAMA S, ENDO M, HASHIBA T, et al. Geotechnical aspects for the excavating performance of the shield machines[C]// The 21st Annual Lecture in Meeting of Japan Society of Civil Engineers, 1966.
- [2] 吕玺琳, 王浩然, 黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 57 - 62. (LÜ Xi-lin, WANG Hao-ran, HUANG Mao-song. Limit theoretical study on face stability of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 57 - 62. (in Chinese))
- [3] LEE I M, LEE J S, NAM S W. Effect of seepage force on tunnel face stability reinforced with multi-step pipe grouting[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(6): 551 - 565.
- [4] XIE X Y, ZHAO M R, SHAHROUR I. Face stability model for rectangular large excavations reinforced by pipe roofing[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 94: 103132.
- [5] 谢雄耀, 赵铭睿, 周 彪, 等. 管幕作用下矩形大断面开挖面稳定模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11): 2299 - 2310. (XIE Xiong-yao, ZHAO Ming-rui, ZHOU Biao, et al. Model experiment study on stability mechanisms of large rectangular excavation faces under the effect of pipe roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2299 - 2310. (in Chinese))
- [6] PERAZZELLI P, LEONE T, ANAGNOSTOU G. Tunnel face stability under seepage flow conditions[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 459 - 469.
- [7] 王浩然, 黄茂松, 吕玺琳, 等. 考虑渗流影响的盾构隧道开挖面稳定上限分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1696 - 1704. (WANG Hao-ran, HUANG Mao-song, LÜ Xi-lin, et al. Upper-bound limit analysis of stability of shield tunnel face considering seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1696 - 1704. (in Chinese))